

Análisis mecánico de estructuras y elementos de sujeción incluyendo aplicativo para  
realización de cálculos ajustados a la norma técnica de la empresa de energía de Pereira  
a niveles de media tensión (13,2 Kv)

José Alejandro Grajales Henao

Pereira, 30 de noviembre de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PERIRA

Ingeniería eléctrica



Análisis mecánico de estructuras y elementos de sujeción incluyendo aplicativo para realización de cálculos ajustados a la norma técnica de la empresa de energía de Pereira a niveles de media tensión (13,2 Kv)

José Alejandro Grajales Henao

Proyecto presentado para optar por el título en  
Ingeniería Eléctrica

Director

Jorge Humberto Sanz Álzate

Pereira, 30 de noviembre de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica



## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo todos mis proyectos.*

*A Jorge Humberto Sanz Álzate, por guiarme durante todo este largo proceso, sin el cual este proyecto de grado no sería posible.*

*A mis padres y hermanos, por apoyarme y darme la mano en todo momento, aun en los más difíciles.*

*A Juliana Ceballos, por ser mi apoyo incondicional, por comprenderme, darme ánimos y ayudarme en todo momento.*

## Índice general

Índice de Tablas.....	6
Índice de figuras.....	7
Objetivos.....	8
Introducción.....	9
Justificación.....	10
Planteamiento del problema.....	11
1. Hipótesis.....	12
1.1. Velocidad de viento máximo.....	12
1.2. Temperatura mínima.....	12
1.3. Condición diaria.....	12
1.4. Temperatura máxima ambiente.....	13
2. Vanos.....	13
2.1. Vano regulador.....	14
2.2. Vano máximo.....	14
2.3. Vano máximo por péndulo.....	14
2.4. Vano máximo permitido por la estructura .....	15
2.5. Vano critico .....	15
2.6. Vano peso .....	16
2.7. Vano viento .....	16
3. Flechas y esfuerzos .....	18
3.1. Flechas.....	18
3.1.1. Terreno nivelado.....	18
3.1.2. Terreno desnivelado.....	18
3.2. Esfuerzos .....	19
3.2.1. Debidos al viento .....	19
3.2.2. Fuerza del viento sobre la estructura.....	21
3.2.3. Fuerza del viento sobre los conductores .....	22
3.2.4. Esfuerzos longitudinales .....	25
3.2.5. Esfuerzos por cambios de dirección de la línea.....	26

4. Condiciones de carga en estructuras mecánicas de media tensión(13,2Kv).....	28
4.1. Condición de carga normal .....	28
4.2. Condición de carga anormal.....	28
4.2.1. Estructura terminal .....	28
4.2.2. Estructura de retención.....	28
4.2.3. Estructura de suspensión .....	29
4.3. Condición de montaje .....	29
5. Momentos en estructuras mecánicas de redes de media tensión (13,2Kv).....	30
5.1. Momento resistente de la estructura.....	30
5.2. Momento debido a la acción del viento sobre la estructura.....	31
5.3. Momento debido al cambio de dirección de la línea .....	32
5.4. Momento debido a la acción del viento sobre los conductores.....	32
6. Retenidas o templetes.....	33
7. Cimentaciones.....	35
8. Bibliografía.....	38

## **Índice de tablas**

Tabla 1: parámetros de la hipótesis de velocidad de viento máximo

Tabla 2: parámetros de la hipótesis de temperatura mínima

Tabla 3: parámetros de la hipótesis de condición diaria

Tabla 4: parámetros de la hipótesis de temperatura máxima ambiente

Tabla 5: valor de K para redes de media tensión (13,2Kv)

Tabla 6: valores de S1 dependiendo de la topografía del terreno

Tabla 7: tipos de rugosidad y clasificación

Tabla 8: rugosidad dependiendo del tipo de terreno y de la altura de la estructura

Tabla 9: valor de S4 dependiendo de la altura sobre el nivel del mar

Tabla 10: valores de Cf dependiendo del régimen de flujo de viento y de la relación entre la altura del poste y el diámetro de la punta de la estructura circular

Tabla 11: valores de Cf para diferentes tipos de cables

Tabla 12: valores de K dependiendo de las condiciones de régimen de flujo de viento y esbeltez del conductor

Tabla 13: calibre de conductores y tipo de conductores AAAC

Tabla 14: calibre de conductores y tipo de conductores ACSR

Tabla 15: factores de seguridad

Tabla 16, cables a utilizar en sistemas de retenidas o templetes.

Tabla 17: valor de Ch para una profundidad de 2 metros

Tabla 18, enterramiento y cimentación de postes.

## **Índice de figuras**

Figura 1, determinación de las longitudes de los vanos

Figura 2, esquema de la estructura con sus respectivas longitudes y cimentaciones.

## Objetivos

Como se ha mencionado anteriormente la necesidad de poseer un estudio profundo de las condiciones que afectan el montaje y diseño de las redes de media tensión en el área de influencia de la norma técnica de la empresa de energía de Pereira, es por esto que se hace necesario plantear los alcances y lo que se espera lograr en el presente documento.

Así como base fundamental se desea analizar todas las fuerzas existentes sobre las estructuras mecánicas del sistema de media tensión (13,2 Kv) en la ciudad de Pereira, dichas fuerzas son la ejercida por el viento sobre los conductores, la fuerza que ejerce el viento sobre las estructuras, abrazaderas, crucetas, aisladores y accesorios de las estructuras mecánicas, la fuerza ejercida sobre la estructura por los cambios de dirección, por el peso propio de los conductores. Además se desea analizar los momentos generados en la base de la estructura mecánica para así, poder determinar la cimentación de la posteria si lo es necesario, o si por el contrario se puede utilizar templetes o retenidas.

En general también se busca determinar si un tendido específico cumple con las normas establecidas por la empresa de energía de Pereira en cuanto al tipo de conductor a utilizar, el tipo de templete, el máximo ángulo de oscilación de las líneas, el máximo momento aplicable a la base de la estructura.

Como anexo a este documento se presentara un ejemplo aplicativo de un tendido de red a 13,2 Kv que consta de dos tramos, al cual se le aplicaran todos los aspectos mencionados en el presente documento con el fin de verificar la veracidad de lo plasmado en el mismo.



## **Introducción**

En el momento de realizar el tendido de una nueva línea de media tensión es necesario realizar un conjunto de análisis los cuales entre otros se basan en el cálculo de los conductores a utilizar, determinación de La tensión de operación, potencia a transportar y cálculo de los elementos mecánicos.

Este documento tendrá como fin hacer un análisis completo de las estructuras mecánicas de media tensión donde se tendrán en cuenta las fuerzas ejercidas sobre conductor, postes, aisladores, elementos de sujeción y además se incluirá una plantilla de Excel donde se pueden realizar de manera rápida dichos cálculos, donde el diseñador tendrá la posibilidad de ingresar los datos de la línea, como la distancia entre postes, tipo de conductor, peso de elemento de sujeción, transformadores y demás equipos ubicados en los postes.

La empresa de energía de Pereira es clara en cuanto a esta normativa y en cuanto a los valores necesarios para realizar un diseño adecuado, donde se tiene en cuenta los esfuerzos máximos en los soportes dados por el fabricante, la tensión máxima en los conductores a utilizar y todos los parámetros necesarios para encontrar cada uno de dichos factores.

Es necesario aclarar que este documento será descrito todo por las normativas existentes y sobre las cuales rijan todos los cálculos y desarrollos aquí plasmados. La norma técnica de la empresa de energía de Pereira y el RETIE será los pilares fundamentales para el desarrollo de esta tesis, además, se tendrá en cuenta la normativa de otras empresas como lo son la EBSA, CHEC y CODENSA para apoyar los cálculos y obtener una perspectiva más amplia acerca de los requerimientos exigidos en el territorio colombiano.

## **Justificación**

La necesidad de expandir el sistema eléctrico de potencia ha llevado a que se deba ser específico al momento de realizar los tendidos de las líneas, es así como para sistemas de media tensión es necesario tener en cuenta una serie de factores demasiado amplios, los cuales entre otros abarcan el nivel de tensión, la longitud de la línea, las protecciones, las estructuras mecánicas, transformadores, medidores etc.

Es por esto que para ayudar a la realización de un diseño más exacto y rápido se desea implementar una plantilla de Excel que permita al usuario conocer cuáles son y de qué tipo las fuerzas existentes sobre las estructuras mecánicas de media tensión y sobre sus elementos además, siendo de gran utilidad en el entorno Pereirano ya que se aplicará regido bajo la normativa de la empresa de energía de Pereira. Es necesario aclarar que también se presentara un desglose de la misma normativa, donde se especifica cada uno de sus ítems en base a las estructuras mecánicas, para dar un enfoque más exacto que permita determinar al momento de realizar un diseño, cuales son los factores a tener en cuenta.

Este proceso se realizará pensando en las nuevas redes de media tensión (13,2KV), las cuales necesitan un riguroso diseño y más aun pensando en la expansión del sistema eléctrico tanto de distribución como de potencia, los cuales deben de contar con herramientas suficientes y deben de tener clara las normativas que los rigen para obtener diseños adecuados y seguros. Utilizando las nuevas herramientas computacionales se pueden mejorar muchos procesos y entre ellos los sistemas de media tensión a tratar en este documento no son la excepción, la automatización de los cálculos hará cada vez más confiable, seguro y rápido la implementación de cualquier clase de sistema, bajo cualquier tipo de condición y bajo la normativa específica aplicable.

## **Planteamiento del problema**

En el desarrollo del presente problema se planteará un modelo completo que permita determinar todos los parámetros, ecuaciones, normas y consideraciones necesarias para realizar un diseño adecuado de las redes de media tensión (13,2KV) regido por la norma técnica de la empresa de Pereira.

Para desarrollar por completo todos los aspectos a tener en cuenta en el cálculo mecánico de las redes de media tensión una serie de hipótesis.

## 1. Hipótesis

**1.1 Velocidad de viento máximo:** tomada en cuenta para determinar los esfuerzos y tensiones en conductores y cables de guarda.

PARÁMETROS	$0 \leq \text{msnm} < 1000$	$1000 \leq \text{msnm} < 2000$	$2000 \leq \text{msnm}$
Velocidad máxima del viento (km/h)	100	80	60
Temperatura coincidente (°C)	21	15	9

Tabla 1, parámetros de la hipótesis de velocidad de viento máximo.

### 1.2 Temperatura mínima:

Esta hipótesis es tomada en cuenta para la determinación de tensiones y esfuerzos en los conductores y cables de guarda.

Es importante aclarar que para los cálculos sometidos a la norma de la empresa de energía de Pereira los conductores no deben estar sometidos a una tensión mayor al 30% de la tensión de ruptura del conductor.

PARÁMETROS	$0 \leq \text{msnm} < 1000$	$1000 \leq \text{msnm} < 2000$	$2000 \leq \text{msnm}$
Velocidad máxima del viento (km/h)	60	48	36
Temperatura mínima (°C)	19	13	4

Tabla 2, parámetros de la hipótesis de temperatura mínima.

### 1.3 Condición diaria:

Esta hipótesis es utilizada para el cálculo de los factores de riesgo de diseño para los conductores, para esta condición los conductores no deben estar sometidos a tensiones mecánicas mayores al 30% de la tensión de ruptura del conductor.

Es importante decir que todos los conductores se deben templar o tensionar el mismo día, para garantizar que todos estén sometidos a las mismas condiciones.

PARÁMETROS	$0 \leq \text{msnm} < 1000$	$1000 \leq \text{msnm} < 2000$	$2000 \leq \text{msnm}$
Velocidad máxima del viento (km/h)	15	11	7
Temperatura promedio (°C)	25	19	14

Tabla 3, parámetros de la hipótesis de condición diaria.

#### 1.4 Temperatura máxima ambiente:

Esta hipótesis es necesaria para calcular las flechas máximas, lo que conlleva también a calcular la altura necesaria de la estructura mecánica. El efecto joule y la radiación solar aumentan la temperatura del conductor y por consiguiente su longitud, además el efecto creep asociado a la elongación del conductor por la tensión mecánica.

Es necesario decir que para la hipótesis de temperatura máxima ambiente la temperatura del conductor será de 60 °C.

PARÁMETROS	$0 \leq \text{msnm} < 1000$	$1000 \leq \text{msnm} < 2000$	$2000 \leq \text{msnm}$
Temperatura máxima ambiente (°C)	33	26	24

Tabla 4, parámetros de la hipótesis de temperatura máxima ambiente.

## 2. Vanos

Los vanos son cálculos utilizados para la determinación directa o indirecta de las flechas, esfuerzos y tensiones en conductores y cables de guarda, esfuerzos transversales y verticales en las estructuras, así como la altura de las mismas y nos permite además seleccionar una hipótesis de diseño adecuada.

### 2.1 Vano regulador:

Es un tramo diseñado que permite los mejores cálculos mecánicos del perfil de la línea, aun teniendo en cuenta las variaciones del terreno.

El vano regulador se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i}}$$

Ecuación 1.

a = longitud del vano medido horizontalmente, medido en metros.

ar = vano regulador.

### 2.2 Vano máximo:

Es el vano mínimo comprendido entre el vano máximo por péndulo y el vano permisible por la altura de la estructura mecánica.

### 2.3 Vano máximo por péndulo:

Este vano es utilizado para calcular la flecha máxima utilizada para garantizar la distancia mínima entre los conductores.

Se debe aclarar para este tipo de vano, que la distancia obtenida en el vano máximo por péndulo debe ser menor a la distancia real entre conductores.

Para hallar la distancia mínima se utiliza la siguiente ecuación.

$$D = k \cdot \sqrt{f + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Ecuación 2.

Donde:

D = separación entre conductores de una misma estructura

K= factor de dependencia de oscilación del conductor por el viento, el cual para conductores ASCR según la norma técnica de la empresa de energía es de 0,75 y para conductores AAAC es de 1.

f= flecha máxima

$\lambda$ = longitud de la cadena de aisladores en metros en suspensión, si contamos con una estructura en retención, este valor es 0.

U= tensión nominal de la línea (13,2 Kv).

Angulo de oscilación	Valor de K (13,2 Kv)
superior a 65°	0,65
entre 40° y 65°	0,6
mayor a 65°	0,55

Tabla 5, valor de K para redes de media tensión (13,2Kv)

#### 2.4 Vano máximo permitido por la altura de la estructura:

Este vano se calcula utilizando una flecha que permite el vano máximo dependiendo de la altura de la estructura.

La flecha para esta condición se calcula de la siguiente manera.

$$f_{\max} = L_m - h_{\min}$$

Ecuación 3.

## 2.5 Vano crítico:

Este tipo de vano es aquel donde el conductor por acción de la temperatura disminuye su tensión mecánica pero aumenta debido al aumento de carga. El vano crítico se calcula de la siguiente manera.

$$a_c = t_{max} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_A - \theta_B)}{W_A^2 - W_B^2}}$$

Ecuación 4.

ac = vano critico

tmax = tensión máxima de operación del conductor en Kg/mm<sup>2</sup>

$\alpha$  = coeficiente del conductor en °C<sup>-1</sup>

$\theta_A$  = temperatura de hipótesis de máxima velocidad del viento, °C

$\theta_B$  = temperatura de hipótesis de temperatura mínima, °C

WA = peso del conductor en la hipótesis de máxima velocidad del viento, °C

WB = peso del conductor en la hipótesis de temperatura mínima, °C

## 2.6 Vano peso:

El vano peso o gravivano es utilizado para calcular los esfuerzos verticales que pueden transmitir los conductores a la estructura.

Para hallar el vano peso se utiliza la siguiente ecuación.

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}$$

Ecuación 5.

ag = vano peso o gravivano

ag1 = longitud desde la estructura hasta el vértice del vano anterior, m

ag2 = longitud desde la estructura hasta el vértice del vano posterior, m



## 2.7 Vano viento:

Este tipo de vano permite calcular los esfuerzos transversales ejercidos sobre la estructura por el efecto del viento sobre los conductores.

El vano viento o eolovano se calcula de la siguiente manera.

$$a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

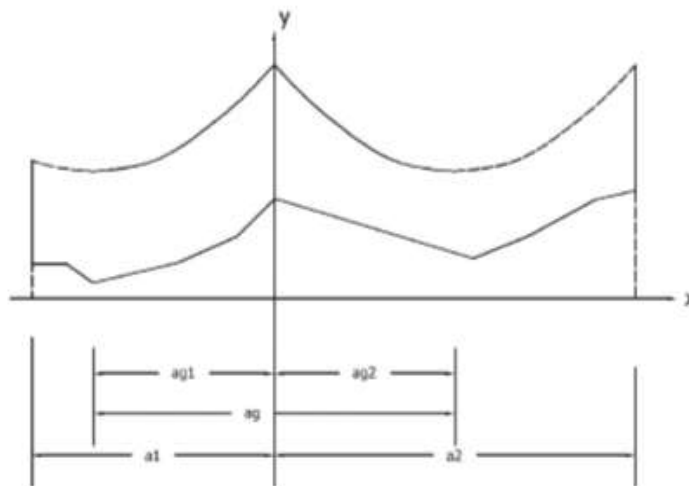
Ecuación 6

$a_v$  = Vano viento o eolovano

$a_1$  = Es la distancia horizontal del vano desde el apoyo posterior

$a_2$  = Es la distancia horizontal del vano desde el apoyo posterior

**Nota:** la siguiente imagen ilustra cómo se deben tomar los vanos para hallar el vano peso, medidos desde el eje Y, tanto para el vano peso como para el vano viento



### 3. Flechas y esfuerzos

#### 3.1 Flechas:

El cálculo de las flechas se hace bajo las hipótesis de temperatura máxima y temperatura mínima.

Es necesario decir que las flechas se calculan de manera diferente para terrenos desnivelados y nivelados, así a continuación se determina la manera para hallar dichas flecha.

##### 3.1.1 Terreno nivelado:

$$f = h \left[ \cosh \left( \frac{a}{2h} \right) - 1 \right]$$

Ecuación 7

##### 3.1.2 Terreno desnivelado:

$$f = h \cdot \cosh \left( \frac{x_m}{h} \right) \left[ \cosh \left( \frac{a}{2h} \right) - 1 \right]$$

Ecuación 8

Para estos casos:

$h$  = parámetro del conductor, determinado por la tensión horizontal en el punto más bajo dividido entre el peso por unidad de longitud del conductor ( $T = \frac{T_{rup}}{0,3}$ )

$a$  = longitud del vano medido horizontalmente

$x_m$  = es un promedio entre la longitud media entre ambos lados del vano desnivelado.

$$x_m = \frac{x_d - x_i}{2}$$

Ecuación 9

$x_d$  = Abscisa medida al lado derecha del punto más bajo del vano

$X_i$  = Abscisa medida al lado izquierdo del punto más bajo del vano

### 3.2 Esfuerzos

Las estructuras mecánicas están sometidas a fuerzas externas debido a la acción del viento sobre los conductores y cables de guarda, peso de herrajes y equipos, acción del viento sobre los mismos y acción del viento sobre las estructuras mecánicas.

#### 3.2.1 Debidos al viento:

Estos esfuerzos son generados por el viento sobre las estructuras y cables, para hallar estos esfuerzos, primero hay que definir algunos parámetros que dependen del terreno, de la altura sobre el nivel del mar y de la altura de la estructura entre otros.

Topografía	valor de $S_1$
1) Todos los casos excepto 2 y 3	1
2) Laderas y partes altas de montañas, además de valles donde se acelera el flujo de viento	1,1
3) Valles cerrados por montañas donde no hay flujo de viento	0,9

Tabla 6, valores de  $S_1$  dependiendo de la topografía del terreno

Tipos de rugosidad	
Rugosidad 1	Campos abiertos sin obstrucciones
Rugosidad 2	Campos abiertos con vallas
Rugosidad 3	Campos con muchas vallas, pueblos o afuera de ciudades
Rugosidad 4	Zonas grandes y frecuentes obstrucciones como centros de ciudad

Tabla 7, tipos de rugosidad y clasificación

Altura (m)	Rugosidad 1	Rugosidad 2	Rugosidad 3	Rugosidad 4
3	0,78	0,67	0,6	0,52
5	0,83	0,74	0,65	0,55
10	0,93	0,88	0,74	0,62
15	0,99	0,95	0,83	0,69
20	1,02	0,98	0,9	0,75
30	1,05	1,03	0,97	0,85
40	1,08	1,06	1,01	0,93
50	1,1	1,08	1,04	0,98
60	1,12	1,1	1,06	1,02
80	1,15	1,13	1,1	1,07
100	1,17	1,16	1,12	1,1

Tabla 8, rugosidad dependiendo del tipo de terreno y de la altura de la estructura.

El valor S2 se escoge de la tabla anterior teniendo en cuenta el tipo de terreno, la clasificación de rugosidad y la altura de la estructura.

Se define un valor de S3 igual a 1,05 debido a la vida útil de las estructuras por la norma NSR-98

Se definirá además un valor de S4 el cual dependerá de la altura sobre el nivel del mar.

Altura sobre el nivel del mar (m)	S4
0	1
500	0,94
1000	0,88
1500	0,83
2000	0,78
2500	0,73
3000	0,69

Tabla 9, valor de S4 dependiendo de la altura sobre el nivel del mar

Los valores anteriormente mencionados son utilizados para hallar la velocidad del viento para realizar el diseño y el valor de la presión dinámica del viento sobre las estructuras de la siguiente manera:

$$V_s = V \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

Ecuación 10, velocidad del viento de diseño

$$q = 0,0048 \cdot V_s^2 \cdot S_4$$

Ecuación 11, presión dinámica del viento

Donde:

$V_s$  = velocidad del viento de diseño en Km/h

$V$  = velocidad máxima del viento en Km/h

$q$  = presión dinámica del viento sobre la estructura en  $\text{Kg}/\text{m}^2$

### 3.2.2 Fuerza del viento sobre estructuras:

Esta fuerza es la que ejerce el viento sobre el poste debido a su área perpendicular al flujo del viento lo que genera una presión sobre la superficie del poste la cual se transforma en una fuerza que soporta toda la estructura del poste y se calcula como se muestra a continuación:

$$Fva = Cf * q * Ae$$

Ecuación 12

Donde

$Fva$  = fuerza por acción del viento sobre la estructura en Kg

$Cf$  = es un coeficiente para determinar la fuerza sobre la estructura (ver tabla)

$q$  = presión dinámica del viento en  $\text{Kg}/\text{m}^2$

$Ae$  = área efectiva normal al flujo del viento

$$Ae = \frac{d1 + d2}{200} * H$$

Ecuación 13

La siguiente tabla presenta información para hallar el valor de  $C_f$  en estructuras de sección circular

		Cf para una relación $h/\phi$						
Tipo de superficie	$\phi \cdot V_s$ (m/s <sup>2</sup> )	0,5	1	2	5	10	20	inf
Todo tipo de superficie	<6							
Áspera o con proyecciones	≥6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1,2
Lisa	≥6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

Tabla 10, valores de  $C_f$  dependiendo del régimen de flujo de viento y de la relación entre la altura del poste y el diámetro de la punta de la estructura circular

Donde:

$h$  = altura del poste

$\phi$  = es el diámetro de la punta de la estructura, ya sea construida en concreto o en fibra de vidrio y esta medida en m.

$V_s$  = velocidad del viento de diseño (ecuación 10).

$\Phi \cdot V_s$  = régimen del flujo de viento en  $m^2/s$ .

### 3.2.3 Fuerza del viento sobre conductores:

Esta fuerza se genera debido a la acción del viento sobre los conductores en dirección normal a ellos, para calcular la fuerza del viento sobre los conductores se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_{cv} = C_f * q * K * L_v * \phi$$

Ecuación 14

Donde:

$F_{cv}$  = fuerza del viento sobre el conductor medida en Kg.

$C_f$  = coeficiente de fuerza para alambre y cables.

$q$  = presión dinámica del viento medida en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

$K$  = coeficiente de reducción.

$L_v$  = longitud del vano viento medido en m.

$\Phi$  = diámetro del conductor medido en m.

A continuación se muestra una tabla donde se encuentra el valor de  $C_f$  para diferentes tipos de conductores.

Régimen de flujo ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Alambres de superficie lisa	Alambre galvanizado o pintado	Cable de trenzado fino	Cable de tensado grueso
$\Phi \cdot V_s < 0,6$	1,2	1,2	1,2	1,3
$\Phi \cdot V_s \geq 0,6$	0,5	0,7	0,9	1,1

Tabla 11, valores de  $C_f$  para diferentes tipos de cables

Donde:

$V_s$  = velocidad del viento de diseño (ecuación 10)

$\Phi \cdot V_s$  = régimen del flujo de viento en  $\text{m}^2/\text{s}$ .

A continuación se plantea una tabla con los valores de  $K$  para los valores de la relación: longitud del vano viento sobre diámetro del conductor

	Lv/φ							
	2	5	10	20	40	50	100	∞
Cilindro circular ,flujo sub critico	0,58	0,62	0,68	0,74	0,82	0,87	0,98	1
Cilindro circular ,flujo súper critico	0,8	0,8	0,82	0,9	0,98	0,99	1	1
Elemento plano perpendicular al viento	0,62	0,66	0,69	0,81	0,87	0,9	0,95	1

Tabla 12, valores de K dependiendo de las condiciones de régimen de flujo de viento y esbeltez del conductor

Donde:

Lv = longitud del vano viento

Φ = diámetro del conductor

En este punto es necesario saber qué tipos de conductores son utilizados en la zona de influencia de la empresa de energía de Pereira.

Los conductores a utilizar para la instalación de redes de media tensión son de tipo ACSR o AAAC con un calibre mínimo igual a 1/0 y uno máximo 4/0, en el tendido de líneas a 13,2 Kv en zonas rurales se debe considerar por consentimiento de la empresa el uso de conductores semiaislados o ecológicos y en redes urbanas utilizando conductores con separadores

La tabla, contiene datos respectivos de los conductores a utilizar.

Calibre(AWG)	Clase de cableado	Numero de hilos	Diámetro de hilo mm	Diámetro del conductor mm	Peso conductor Kg/Km	carga de rotura Kg
4/0	AAA	7	4,42	13,25	294,2	3327
3/0	AAA	7	3,93	11,8	233,3	2639
2/0	AAA	7	3,5	10,51	185	2093
1/0	AAA		3,12	9,36	146,8	1734

Tabla 13, calibre de conductores y tipo de conductores AAAC



Calibre(AWG)	Clase de cableado	Numero de hilos		Diámetro de hilo mm		Diámetro del conductor mm	Peso conductor Kg/Km	carga de rotura Kg
		Aluminio	Acero	Aluminio	Acero			
4/0	ACSR	6	1	4,77	4,77	14,31	433	3784
3/0	ACSR	6	1	4,25	4,25	12,74	342	2998
2/0	ACSR	6	1	3,78	3,78	11,35	272	2407
1/0	ACSR	6	1	3,37	3,37	10,11	216	1988

Tabla 14, calibre de conductores y tipo de conductores ACSR

### 3.2.4 Esfuerzos longitudinales:

Este tipo de esfuerzos se presentan únicamente en estructuras terminales o de retención generado por los conductores y cables de guarda sujetos a la estructura.

Para realizar el cálculo de los esfuerzos longitudinales se deben tener en cuenta los módulos de elasticidad de los conductores a utilizar y el coeficiente de variación lineal de temperatura.

$$E = 7000 \frac{m+3}{m+1} \frac{Kg}{mm^2}$$

Ecuación 15

$$\alpha = 11,5 * 10^{-6} * \frac{2m+3}{m+3} \frac{1}{^{\circ}C}$$

Ecuación 16.

Donde:

m = relación entre las áreas de aluminio y de acero

Se presenta entonces a continuación la ecuación de cambio de estado que permite encontrar las tensiones iniciales y finales del conductor al variar las hipótesis de diseño.

Para el cálculo de las tensiones se procede así

$$t^2 \left[ t + SE\alpha(T - T_i) + \frac{SElf_{ci}^2}{24t_i^2} - t_i \right] = \frac{SEl^2f_c}{24}$$

Ecuación 17.

$$F^3 - F \left[ F_i^2 + \frac{3l^2 \alpha (T - T_i)}{8} - \frac{3l^2 t_i}{8SE} \right] = \frac{3l^4 f_c}{64SE}$$

Ecuación 18.

Donde:

$t$  = Es la tensión final del conductor en Kg/m

$T$  = Temperatura final de hipótesis en °C

$t_i$  = tensión inicial del conductor en Kg/m

$\alpha$  = coeficiente de dilatación lineal en 1/°C

$T_i$  = temperatura inicial de hipótesis en °C

$E$  = módulo de elasticidad en Kg/mm<sup>2</sup>

$S$  = área del conductor en mm<sup>2</sup>

$f_c$  = esfuerzo final del conductor en kg/m

$f_{ci}$  = Esfuerzo inicial del conductor en kg/m

$F$  = flecha final en m

$F_i$  = flecha inicial en m

$l$  = longitud del vano en m

### 3.2.5 Esfuerzos por cambios de dirección de la línea

Estos esfuerzos aparecen en la línea debido a que hay un desequilibrio en las tensiones a ambos lados de la estructura, debido a que las componentes horizontales de la tensión varían dependiendo del ángulo al que se encuentren, es por esto que es necesario aplicar una ecuación que permita utilizando las tensiones iniciales y finales del conductor debido a las condiciones de hipótesis encontrar dicha tensión.

La ecuación 19 plantea el modelo a seguir para hallar dicha tensión.

$$fcd = th12 * sen\left(\frac{\beta}{2}\right) + th22sen\left(\frac{\beta}{2}\right) + fvc * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Ecuación 19

#### **4. Condiciones de carga en estructuras mecánicas de media tensión (13,2 Kv)**

En el momento de realizar un trazado de diseño de una línea de media tensión se realiza un análisis para determinar escenarios desfavorables para la misma, donde se evalúa que pasa en condiciones extremas como la ruptura de uno de los conductores, de varios, del cable de guarda o las fuerzas a las que es sometida la estructura al momento de realizarse el montaje de los conductores debido al peso del nuevo elemento sobre la estructura, el peso del o de los operarios, así como los equipos de trabajo y el trabajo de tensado de los conductores, es así como se plantean una serie de hipótesis que describen las situaciones posibles.

##### **4.1 Condición de carga normal**

En esta condición se considera que tanto los conductores como el cable de guarda están sanos, bajo condición diaria (velocidad promedio del viento de diseño y temperatura coincidente).

##### **4.2 Condición de carga anormal**

Nota: para esta condición se debe considerar que cualquier conductor con defectos debe ser el más alto, debido que a mayor altura se presenta los mayores esfuerzos sobre la estructura

###### **4.2.1 Estructura terminal**

Cualquier fase y el cable de guarda rotos, las demás fases y si existe otro cable de guarda sano, bajo las hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

Dos fases diferentes rotas y la fase restante y cable de guarda sanos bajo la hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

###### **4.2.2 Estructura de retención**

Cualquier fase y el cable de guarda rotos, las demás fases y si existe otro cable de guarda sano, bajo las hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

Dos fases diferentes rotas y la fase restante y cable de guarda sanos bajo la hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

#### **4.2.3 Estructura de suspensión**

Una fase rota y las demás fases y cable(s) de guarda sanos, bajo la hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

Conductor de guarda roto y las fases y cable de guarda restante si existe sanos, bajo la hipótesis de viento promedio máximo y temperatura coincidente.

#### **4.3 Condición de montaje**

En esta condición debe considerarse todas las fuerzas a las que estará sometida la estructura debido a la acción del montaje de los conductores eléctricos. Debe considerarse la posibilidad de que en el momento del montaje se pueden superar los esfuerzos de ruptura del poste debido a la acción del peso de los trabajadores, accesorios, herramientas y peso de los conductores previos a utilizarse en las condiciones normales de montaje.

Se debe tener en cuenta además que en el montaje no se superen los momentos de vuelco del poste por las acciones previamente establecidas.

Se hace posible utilizar templete que cumplan con las condiciones especificadas en el numeral 6 del presente documento para evitar ruptura de los templete.

## 5. Momentos en estructuras de redes de media tensión (13,2 Kv)

En el momento en que se desean calcular los momentos resultantes en las estructuras al momento de diseñar, es necesario tener en cuenta ciertos factores de seguridad debidos a las estructuras, al material de construcción de la estructura, al cambio de ángulo de la línea y demás, estos valores se consignan en la siguiente tabla.

Tipo	Fs
Estructura en concreto	2,5
Estructura metálica	1,5
Cargas verticales	1,1
Cargas transversales de viento	2
Cargas longitudinales	1,2
Cargas de ángulo	1,5
Cables para templetes	2
Aisladores y herrajes	3

Tabla 15, factores de seguridad

### 5.1 Momento resistente de la estructura

el momento resistente es toda la tensión mecánica de trabajo a la que está sometida la estructura desde el nivel del piso hasta una altura 20 cm más abajo de la punta de la estructura sin que esta presente alguna deformación.

$$Mr = \frac{Fr * (lt - le)}{2,5}$$

Ecuación 20

Donde:

Mr = momento resistente de la estructura en Kg\*m

Fr = fuerza de ruptura del poste en Kg

lt = longitud total del poste en m

le = longitud de empotramiento del poste en m

$$le = 0.1 * lt + 0,6$$

Ecuación 21

## 5.2 Momento producido por la acción del viento sobre la estructura

Es la fuerza de trabajo que ejerce el viento sobre la estructura tomando como altura el centroide del poste medido desde el nivel del terreno hasta la punta de la estructura

$$Mfv = Fsv * fva * h$$

Ecuación 21

$$h = \frac{lt-le}{3} * \frac{\phi1+2\phi2}{\phi1+\phi2}$$

Ecuación 22

Donde

Mfv = momento generado por la acción del viento sobre la estructura en Kg\*m.

Fsv = factor de seguridad por acción del viento transversal.

fva = fuerza del viento sobre la estructura en Kg.

h = centroide de la estructura donde se aplica la fuerza en m.

## 5.3 Momentos debidos a los cambios de dirección de la línea

Estos momentos se generan debido a la resultante de las tensiones mecánicas por la acción del cambio de línea y se da a la altura de amarre de los conductores.

$$Mcd = Fscd * fcd * Hm$$

Ecuación 23

Donde:

Mcd = momento debido al cambio de dirección en Kg\*m.

Fscd = factor de seguridad para cambios de dirección de la línea.

fcd = fuerza debido al cambio de dirección de la línea en Kg.

Hm = altura de montaje de los conductores en M

#### 5.4 Momento debido a la acción del viento sobre los conductores

Este es el momento que se genera debido a la presión dinámica que ejerce el viento sobre unidad de longitud, lo cual genera una fuerza de trabajo sobre la estructura, dicho momento se calcula de la siguiente manera.

$$M_{fvc} = p_v * \frac{H_1 * n * d_c * (l_2 + l_1)}{200}$$

Ecuación 24

$$p_v = 0.0042 * v^2$$

Ecuación 25

Donde:

M<sub>fvc</sub> = momento generado por la acción del viento sobre conductores

p<sub>v</sub> = presión del viento en kg

H<sub>1</sub> = lugar donde se aplica la fuerza del viento en m

d<sub>c</sub> = diámetro del conductor en m

n = número de conductores

l<sub>2</sub> = longitud del vano anterior

l<sub>1</sub> = longitud del vano siguiente

Para efectos de aplicación en el área de influencia de la empresa de energía de Pereira se debe tener en cuenta que:

$$M_r > M_{fvc} + M_{fv} + M_{cd}$$

Ecuación 26



## 6. Retenidas o templetes

Los templetes o retenidas son elementos de seguridad cuando se encuentran cambios de dirección o cuando se tienen estructuras finales, para ayudar a soportar las fuerzas actuantes sobre las mismas.

Para efectos de aplicación de la norma técnica de la empresa de energía de Pereira se utilizarán cables de retenida desde  $\frac{1}{4}$ " hasta  $\frac{3}{8}$ " como los especificados en la siguiente tabla (tabla 15)

Diámetro del torón		Cantidad de hilos	Diámetro nominal de los alambres galvanizados		Peso aproximado (Kg)	Resistencia mecánica Alta resistencia (Kg)	Resistencia mecánica Extra alta resistencia (Kg)
Pulgadas	mm		Pulgadas	mm			
1/4	6,35	3	0,12	3,05	174	4730	6740
1/4	6,35	7	0,08	2,03	180	4750	6650
9/32	7,14	3	0,13	3,3	204	5260	7500
9/32	7,14	7	0,093	2,36	244	6400	8950
5/16	7,94	3	0,145	3,68	254	6350	9100
5/16	7,94	7	0,104	2,64	305	8000	11200
3/8	9,52	3	0,165	4,19	327	8360	11800
3/8	9,52	7	0,12	3,05	406	10800	15400

Tabla 16, cables a utilizar en sistemas de retenidas o templetes.

A continuación se especifica el cálculo del templete o retenida de dos maneras.

$$Tt = \frac{Tr}{fs}$$

Ecuación 27

$$Tt * \text{sen}(\phi) = n * Fcd$$

Ecuación 28

Donde:

Tt = templete o retenida en Kg

Tr = tensión de ruptura del templete en kg, ver tabla 15

$\Phi$  = ángulo entre el poste y el templete o retenida en grados

n = número de conductores a la altura del amarre del templete

Fcd = fuerza debido al cambio de dirección de la estructura en Kg.

## 7. Cimentaciones

Es necesario determinar las cimentaciones de los postes, ya que estos en ocasiones no cuentan con retenidas o templetes, los postes autor retenidos deben llevar una base en concreto, la cual debe poseer un factor de seguridad que ayude a estabilizar las cargas en la estructura mecánica de la línea.

Es así como se analizaran dos tipos de cimentación para los postes las cuales son cilíndricas o prismáticas, hechas en hormigón y las cuales deben cumplir con los siguientes parámetros.

$$Cs = \frac{Me}{Mv}$$

Ecuación 29.

Donde:

Cs = Es el factor de seguridad de la cimentación el cual para efectos de la norma debe ser mayor a 1.5.

Mv = Es el momento de volcamiento.

Me = Es el momento estabilizador de la estructura.

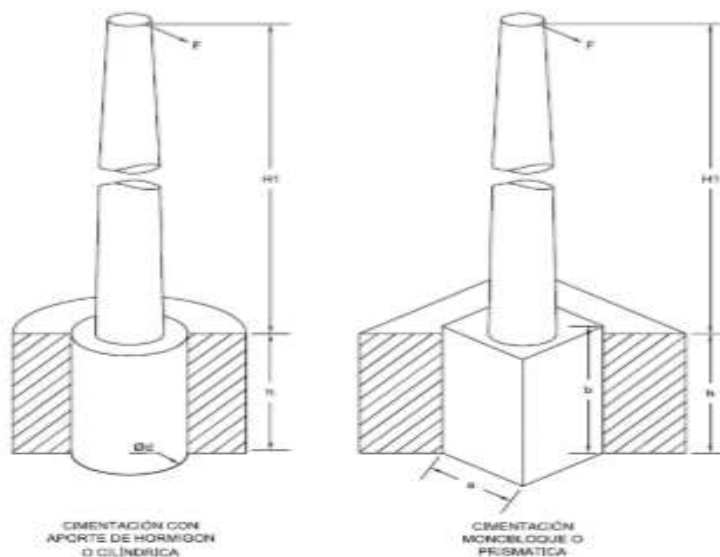


Figura 2, esquema de la estructura con sus respectivas longitudes y cimentaciones.

$$Mv = F * \left( H1 + \frac{2}{3} h \right)$$

Ecuación 30.

Donde:

F = Fuerza resultante en la punta de la estructura en Kg.

H1 = Altura desde el terreno hasta el punto donde se realiza la fuerza en m.

h = Profundidad de cimentación de la estructura en m.

$$Me = \frac{d * h^3}{52,8} * ch * \tan(\alpha)$$

Ecuación 31.

Donde:

d = es el diámetro de la cimentación en m.

h = profundidad de la cimentación en m.

Ch = es el coeficiente de compresibilidad del terreno a una profundidad h en  $Kg * m^3$

$\alpha$  = máximo ángulo de rotación de la estructura admisible

$\alpha \leq 0,573^\circ$

La siguiente tabla presenta los valores de Ch para diferentes tipos de terreno.

Coeficiente de compresibilidad del suelo			
Terreno	Ch(Kg/m <sup>3</sup> )X10 <sup>6</sup>		Ch(Kg/m <sup>3</sup> )
Arcilla húmeda	3 a 6	Terreno flojo	8
Arcilla seca	7 a 8		
Tierras sueltas	9 a 10	Terreno normal	12
Tierras compactas	11 a 12		
Grava gruesa con arena	13 a 15	Terreno rocoso	16
Grava gruesa	16 a 18		
Roca blanda	19 a 20		

Tabla 17, coeficiente de compresibilidad del terreno a una profundidad de 2 metros.

Enterramiento y Cimentación de postes						
Altura del poste	Profundidad de enterramiento	Profundidad de la cimentación	Capacidad de ruptura en la punta del poste(Kgf)			
L(m)	Le(m)	Lc(m)	510	750	1050	1350
			diámetro de la excavación(m)			
8	1,4	1,5	0,5	0,5	0,6	-
10	1,6	1,7	0,6	0,5	1	-
12	1,8	1,9	0,6	0,75	1	1,1
14	2	2,1	-	0,75	1	1,1

Tabla 18, enterramiento y cimentación de postes.

## **8. Bibliografía**

- [1] EBSA empresa de energía del Boyacá S.A E.S.P, norma de diseño de redes de distribución de energía eléctrica, Boyacá, Enero de 2014.
- [2] EEP empresa de energía de Pereira S.A E.S.P, norma técnica, Pereira, Enero de 2015
- [3] R. M. Mual "cálculo de líneas y redes eléctricas", edición UPC, Barcelona, 2002
- [4] W. D. Stevenson, J. J. Grainer "análisis de sistemas de potencia", McGraw-Hill, México DF, 1996